

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЁТА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ В МНОГОМАШИННОЙ СИСТЕМЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Розроблено математичну модель багатомашинної системи для розрахунку перехідних режимів в електричній системі промислового підприємства. Модель дає змогу автоматично формувати систему рівнянь для схем довільної конфігурації, враховувати несиметрію, схеми з'єднання обмоток електричних машин, розглядати режими пуску та групового вибігу.

Разработана математическая модель многомашинной системы для расчёта переходных режимов в электрической системе промышленного предприятия. Модель позволяет автоматически формировать системы уравнений для схем произвольной конфигурации, учитывать несимметрию, схемы соединения обмоток электрических машин, рассматривать режимы пуска и группового выбега.

The mathematical model of the multimachine system is developed for the transient process calculation in the electric system of industrial enterprise. The model allows automatically to form the systems of equalizations for the arbitrary configuration schemes, to take into account no symmetry, charts of connection of coils of electric machines, examine the modes of starting and group running-out.

Быстрое развитие микропроцессорной техники даёт возможность реализации сложных алгоритмов защиты и противоаварийной автоматики для более эффективной эксплуатации энергетического оборудования промышленных предприятий. Одним из препятствий на этом пути является отсутствие достоверных данных об изменениях параметров системы электроснабжения (СЭС) в переходных режимах, которые могут быть вызваны аварийными или технологическими возмущениями.

Проведение натуральных экспериментов в СЭС ограничено из-за опасности нарушения устойчивости системы. На действующих предприятиях большую помощь в этом оказывает возможность микропроцессорных терминалов защиты автоматически регистрировать параметры аварийных режимов. При строительстве новых или реконструкции СЭС для решения данной задачи нашло широкое применение математическое моделирование, основанное на решении соответствующей системы дифференциальных уравнений (СДУ) численными методами с помощью ЭВМ.

В теории электротехники и электрических машин достаточно подробно рассмотрены модели отдельных элементов СЭС, которые представлены СДУ в удобной системе координат. Параметром связи с внешней системой, как правило, является напряжение на выводах элемента, которое известно при подключении элемента к источнику электроэнергии неограниченной мощности. В многомашинных системах со сложной структурой для нахождения параметров связи необходимо представить каждый элемент в виде электрической схемы замещения в единой системе координат с её последующим расчётом. Наиболее универсальной, особенно при расчётах несимметричных режимов, является система фазных координат a, b, c, θ .

Элементы СЭС, такие как источник электроэнергии S , линия электропередачи W , трансформатор T , реактор R , асинхронный AD и синхронный SD двигатель (точнее их статорные обмотки), обобщённая нагрузка L возможно в каждый момент времени представить в виде набора ветвей, содержащих активное сопротивление, индуктивность с магнитными связями и электродвижущую силу (ЭДС) (рис. 1).

Методика расчёта параметров схем замещения для статических элементов S, W, T, R, L в координатах a, b, c , а также вращающихся машин AD, SD в координатах α, β, θ .

Методика расчёта параметров схем замещения для статических элементов S, W, T, R, L в координатах a, b, c , а также вращающихся машин AD, SD в координатах α, β, θ .

$d, q, 0$ изложена в [1], [2] соответственно и не вызывает затруднений.

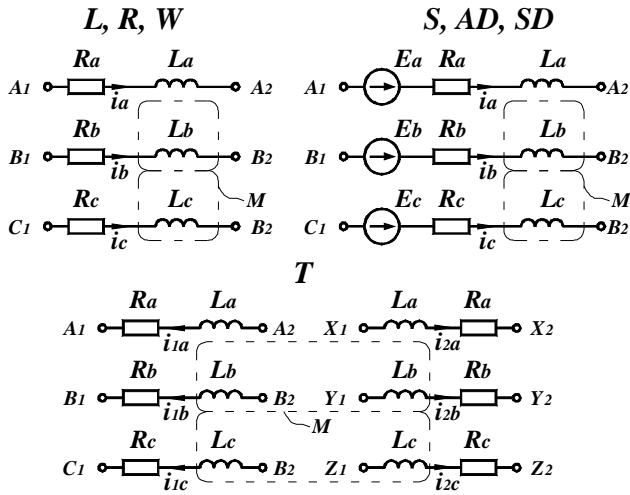


Рис.1. Схемы замещения элементов СЭС в фазных координатах a, b, c

Для пересчёта параметров схемы замещения AD и SD к координатам a, b, c используются выражения:

AD

$$\begin{aligned}
 R_a &= R_b = R_c = R_s, \\
 L_a &= L_b = L_c = L_s + 1 / (1 / L_m + \\
 &\quad + 1 / L_r), \\
 E_a &= L_m (R_r i_{ra} + \psi_r \omega_r) / (L_r + L_m), \\
 E_b &= 0,5 L_m (R_r (\sqrt{3} i_{r\beta} - i_{ra}) + \\
 &\quad + (-\sqrt{3} \psi_{ra} + \psi_{r\beta}) \omega_r) / (L_r + L_m), \\
 E_c &= 0,5 L_m (R_r (-\sqrt{3} i_{r\beta} - i_{ra}) + \\
 &\quad + (\sqrt{3} \psi_{ra} + \psi_{r\beta}) \omega_r) / (L_r + L_m);
 \end{aligned} \tag{1}$$

SD

$$\begin{aligned}
 R_a &= R_b = R_c = R_s, \\
 L_d'' &= L_s + 1 / (1 / L_{ad} + 1 / L_f + 1 / L_{rd}), \\
 L_q'' &= L_s + 1 / (1 / L_{aq} + 1 / L_{rq}), \\
 l_0 &= (L_q'' + L_d'' + L_0) / 3, \\
 m_0 &= (L_0 - (L_q'' + L_d'') / 2) / 3, \\
 l_2 &= (L_q'' - L_d'') / 3, \\
 m_2 &= l_2, \\
 L_a &= l_0 + l_2 \cos 2\gamma, \\
 L_b &= l_0 + l_2 \cos(2\gamma + 120), \\
 L_c &= l_0 + l_2 \cos(2\gamma + 240), \\
 M_{bc} &= m_0 + m_2 \cos 2\gamma,
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$M_{ca} = m_0 + m_2 \cos(2\gamma + 120),$$

$$M_{ab} = m_0 + m_2 \cos(2\gamma + 240),$$

$$L_\alpha = L_q'' \cos^2 \gamma + L_d'' \sin^2 \gamma,$$

$$M_{\alpha\beta} = (L_q'' - L_d'') \sin \gamma \cos \gamma$$

$$L_\beta = L_q'' \sin^2 \gamma + L_d'' \cos^2 \gamma,$$

$$\begin{aligned}
 E_d &= ((-U_f + (R_f + R_r) i_f) / L_f + \\
 &\quad + R_{rd} i_{rd} / L_{rd}) (L_d'' - L_s),
 \end{aligned}$$

$$E_q = R_{rq} i_{rq} / L_{rq} (L_q'' - L_s),$$

$$\begin{aligned}
 E_\alpha &= E_q \cos \gamma - E_d \sin \gamma + (\psi_\beta - L_\alpha i_{s\beta} + \\
 &\quad + M_{\alpha\beta} i_{sa}) dy/dt,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_\beta &= E_q \sin \gamma + E_d \cos \gamma - (\psi_\alpha - L_\beta i_{sa} + \\
 &\quad + M_{\alpha\beta} i_{s\beta}) dy/dt,
 \end{aligned}$$

$$E_a = E_\alpha, \quad E_b = 0.5 (\sqrt{3} E_\beta - E_\alpha),$$

$$E_c = 0.5 (-\sqrt{3} E_\beta - E_\alpha).$$

На начальном шаге численного интегрирования токи в ветвях с индуктивностью определяются начальными условиями, поэтому, падение напряжения на активном сопротивлении можно включить в состав ЭДС ветви, т.е. $e_\Sigma = e - Ri$. Таким образом, в схеме останутся индуктивности, магнитные связи и суммарные ЭДС.

Чтобы сформировать СДУ СЭС необходимо выразить производные токов в ветвях схемы замещения, для чего целесообразно воспользоваться контурными уравнениями [3], записанными относительно производных токов

$$[di_\beta/dt] = [L_k]^{-1} [E_k], \tag{3}$$

$$[di_\alpha/dt] = -[M_\alpha]^{-1} [M_\beta] [di_\beta/dt], \tag{4}$$

где $[di_\alpha/dt]$, $[di_\beta/dt]$ – матрицы производных тока, в ветвях принадлежащих дереву и хордам соответственно; $[L_k]$ – матрица контурных индуктивностей; $[E_k]$ – матрица контурных ЭДС; $[M_\alpha]$, $[M_\beta]$ – подматрицы первой матрицы инцидентий, составленные для ветвей, принадлежащих дереву и хордам соответственно.

Определение напряжений в узлах схемы осуществляется по выражениям

$$[U_\Delta] = [M_\alpha]^{-1} [U_{\text{ва}}], \tag{5}$$

$$[U_{\text{ва}}] = [R_\alpha] [i_\alpha] + [L_\alpha] [di_\alpha/dt] - [E_\alpha], \tag{6}$$

где $[U_{\text{в}a}]$, $[R_a]$, $[L_a]$, $[E_a]$, $[i_a]$ – матрицы падения напряжения, активных сопротивлений индуктивностей, ЭДС и токов в ветвях, принадлежащих дереву, соответственно.

Система (3) дополняется уравнениями роторных контуров и уравнениями движения ротора вращающихся электрических машин. Для упрощения записи они представляются в более удобных для этих элементов системах координат:

AD

$$\begin{aligned} di_{r\alpha}/dt &= (-R_r i_{r\alpha} - \omega_r(L_m + L_{\sigma r}) i_{r\beta} - \\ &\quad - L_m di_{s\alpha}/dt)/(L_m + L_{\sigma r}), \\ di_{r\beta}/dt &= (-R_r i_{r\beta} + \omega_r(L_m + L_{\sigma r}) i_{r\alpha} - \\ &\quad - L_m di_{s\beta}/dt)/(L_m + L_{\sigma r}), \\ M_{\text{эм}} &= 3/2 L_m (i_{r\beta} i_{s\alpha} - i_{r\alpha} i_{s\beta}), \\ d\omega_r/dt &= (-M_{\text{эм}} + M_c)/J \end{aligned}$$

SD

$$\begin{aligned} di_f/dt &= ((U_f - (R_f + R_r) i_f - \\ &\quad - L_{ad} di_{sd}/dt)(L_{ad} + L_{\sigma rd}) - (-R_{rd} i_{rd} - \\ &\quad - L_{ad} di_{sd}/dt) \cdot L_{ad}) / (L_{\sigma f} L_{\sigma rd} + L_{ad} (L_{\sigma f} + \\ &\quad + L_{\sigma rd})), \\ di_{rd}/dt &= ((-R_{rd} i_{rd} - L_{ad} di_{sd}/dt)(L_{ad} + \\ &\quad + L_{\sigma rd}) - (U_f - (R_f + R_r) i_f - \\ &\quad - L_{ad} di_{sd}/dt) \cdot L_{ad}) / (L_{\sigma f} L_{\sigma rd} + L_{ad} (L_{\sigma f} + \\ &\quad + L_{\sigma rd})), \\ di_{rq}/dt &= (-R_r i_{rq} - L_{aq} di_{sq}/dt) / (L_{aq} + \\ &\quad + L_{\sigma rq}), \\ M_{\text{эм}} &= 3/2 (\psi_{\alpha} i_{sq} - \psi_{\alpha} i_{sd}), \\ \psi_{\alpha} &= L_{\sigma rd} i_{sd} + L_{ad} (i_{sd} + i_f + i_{rd}), \\ \psi_{\alpha} &= L_{\sigma q} i_{sq} + L_{aq} (i_{sq} + i_{rq}), \\ d\omega_r/dt &= (-M_{\text{эм}} + M_c)/J, \\ d\gamma/dt &= \omega_r. \end{aligned}$$

Значения i_s , di_s/dt в соответствующих координатных осях находятся с помощью линейных преобразований [4]

$$\begin{aligned} i_{s\alpha} &= i_{sa}, \quad di_{s\alpha}/dt = di_{sa}/dt, \\ i_{s\beta} &= (i_{sb} - i_{sc})/\sqrt{3}, \quad di_{s\alpha}/dt = (di_{sb}/dt - \\ &\quad - di_{sc}/dt)/\sqrt{3}, \\ i_{sd} &= -i_{sa} \cdot \sin\gamma + i_{s\beta} \cdot \cos\gamma, \quad di_{sd}/dt = -di_{sa}/dt \cdot \sin\gamma + \\ &\quad + di_{s\beta}/dt \cdot \cos\gamma - (di_{sa}/dt \cdot \cos\gamma + di_{s\beta}/dt \cdot \sin\gamma) \cdot \omega_r, \\ i_{sq} &= i_{sa} \cdot \cos\gamma + i_{s\beta} \cdot \sin\gamma, \quad di_{sq}/dt = di_{sa}/dt \cdot \cos\gamma + \\ &\quad + di_{s\beta}/dt \cdot \sin\gamma - (di_{sa}/dt \cdot \sin\gamma - di_{s\beta}/dt \cdot \cos\gamma) \cdot \omega_r. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, сформирована СДУ в форме Коши, описывающая СЭС, которую можно решать одним из численных методов интегрирования.

Упрощённый алгоритм расчёта переходных процессов представлен в виде блок-схемы на рис. 2.

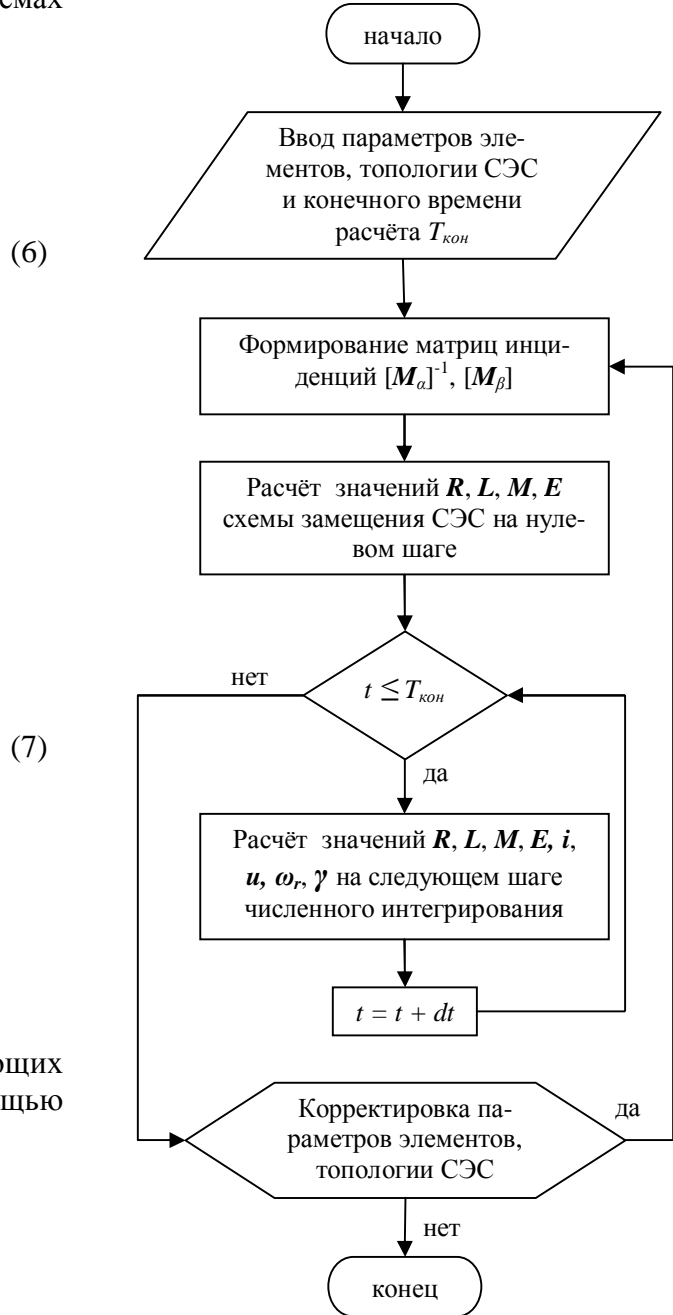


Рис. 2. Упрощённая блок-схема алгоритма расчёта

В качестве примера применения модели рассмотрим расчёт переходного процесса в СЭС, схема замещения которой приведена

на рис. 3, для следующих режимов работы (рис. 4):

- 1) $t = 0$ с, прямой пуск АД и СД на холостом ходу,
- 2) $t = 7,5$ с, синхронизация СД,
- 3) $t = 9$ с, повышение нагрузки на АД и СД до номинального значения,
- 4) $t = 11$ с, однофазное КЗ на землю (в фазе "А") за сопротивлением системы,
- 5) $t = 12$ с, устранение КЗ,

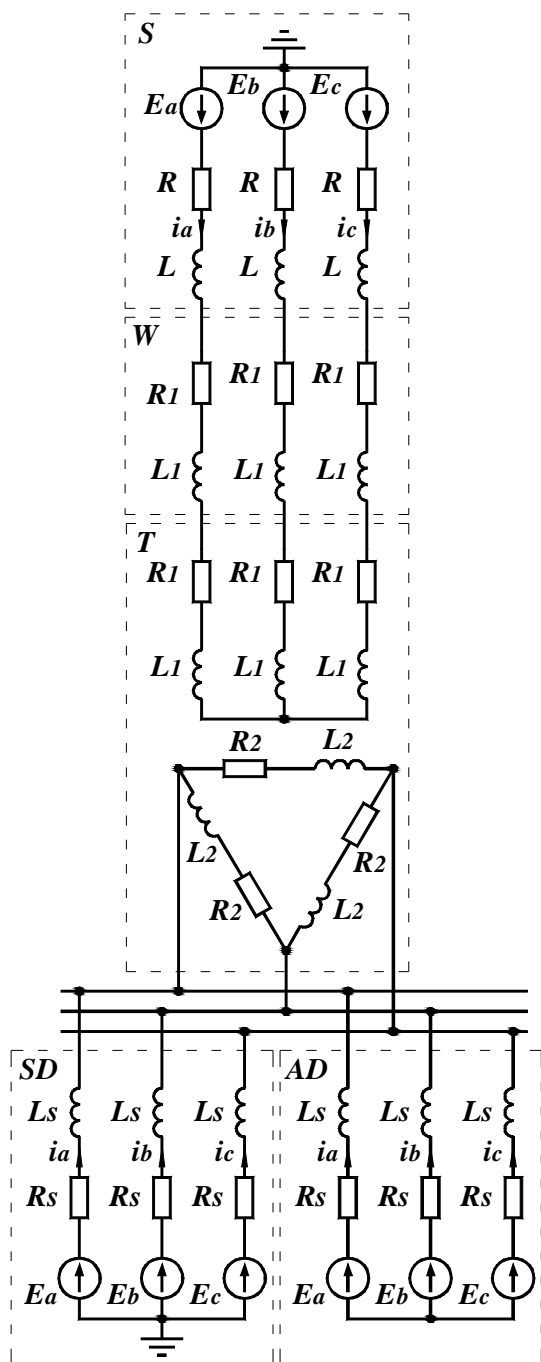


Рис. 3. Схема замещения СЭС

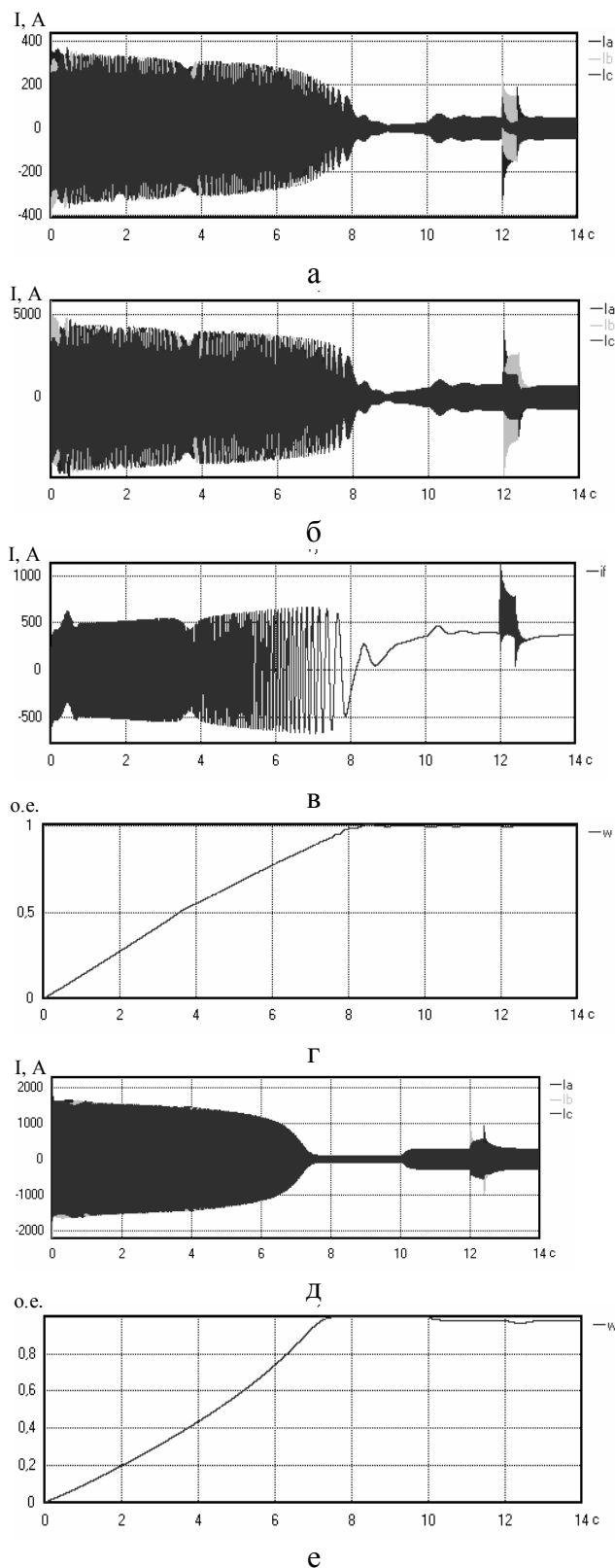


Рис. 4. Осцилограммы изменения отдельных величин: а – тока в фазах системы (S), б – тока в фазах СД (SD), в – тока возбуждения СД (SD), г – скорости вращения СД (SD), д – тока в фазах АД (SD), е – скорости вращения АД (AD)

Осциллограммы рис.4 получены для СЭС рис.3 со следующими параметрами:

S : $U_c = 115$ кВ; $I_k = 14$ кА; $T_a = 0,03$ с;
 W : АСК-240, $l = 15$ км;
 T : $S_{ном} = 25$ МВА; $U_{вн} = 115$ кВ; $U_{нн} = 6,6$ кВ;
 $u_k = 10,5$ %; $P_k = 85$ кВт; $P_x = 18$ кВт; $I_x = 0,7$ %; (обмотки НН соединены параллельно);
 AD : $P_{ном} = 1500$ кВт; $U_{ном} = 6$ кВ; $\eta = 0,95$;
 $\cos\varphi_{ном} = 0,89$; $I_{п} = 6$ о.е.; $M_{п} = 1,2$ о.е.; $M_{макс} = 2,5$ о.е.; $n = 1479$ об/мин; $J = 10$ кг·м²;
 SD : $U_{ном} = 6$ кВ; $I_{ном} = 535$ А; $I_{п} = 1605$ А;
 $n_{ном} = 1500$ об/мин.; $\cos\varphi = 0,9$; $\eta = 96$ %;
 $M_{cl_{s=0}} = 0,8$; $M_{cl_{s=1}} = 0,1$; $I_{f_{xx}} = 154$ А; $I_{f_{ном}} = 395$ А; $T_J = 10$ с.

Выводы. Разработанная математическая модель позволяет формализовать составление системы дифференциальных и алгебраических уравнений и производить расчёт симметричных и несимметричных переходных процессов в СЭС произвольной конфигурации, элементы которой представляются схемой замещения в фазных координатах. Особенностью модели является использование для расчёта производных тока в ветвях метода контурных токов, который даёт возможность производить расчёты в схемах при наличии магнитных связей между индуктивными элементами. Это, в свою очередь, позволяет отказаться от приведения параметров схемы замещения к единой ступени напряжения и учитывать различные схемы соединения обмоток электрических машин.

Список использованной литературы

1. Электрические системы. Электрические сети / [Веников В. А., Глазунов А. А., Жуков Л.А. и др.]; Уч. для электроэнерг. спец.вузов/ Под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева – 2-е изд.: перераб. – М.: Высш. шк., 1998. – 511 с.
2. Гамазин С. И. Переходные процессы в электродвигательно нагрузке систем промышленного электроснабжения/ С.И.Гамазин, Д.Б.Понаровкин, С.А.Цирук. – М.: Из-во МЭИ, 1991. – 352 с.
3. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики / [Веников В. А., Зувев Э. Н., Литкенс И. В. и др.] ; Учебник для студ. вузов / Под ред. В.А.Веникова – 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1981. – 288 с.
4. Бернас С. Математические модели элементов электроэнергетических систем / С.Бернас, З.Цёк // Пер. с польск. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 312 с.

Получено 14.02.2011



Шабовта
Михаил Юрьевич,
ст. преп. каф.
электроснабж.
Одесск. нац. политехн
ун-та
тел.: (048)734-85-67
e-mail:
poststudent@rambler.ru